

智能预警系统在水电站闸门安全管理中的应用探索

谢长宁 李 杰 王东江

国家能源集团四川发电有限公司南桤河水电分公司 四川 雅安 625400

摘 要：随着水电站智能化管理的需求日益增长，智能预警系统在水电站闸门安全管理中的应用显得尤为重要。本文深入探讨了智能预警系统的构成、关键技术及其在水电站闸门应力监测、振动监测、运行姿态监测和启闭机监测等方面的具体应用。智能预警系统的广泛应用将为水电站闸门的安全管理提供有力支持，推动水电站向更加智能化、高效化的方向发展。

关键词：智能预警系统；水电站闸门；安全管理

引言：

水电站作为清洁能源的重要组成部分，其安全、高效运行对于保障能源供应和生态环境具有重要意义。闸门作为水电站的关键设备之一，承担着调节水位、控制流量、保障水电站安全运行等重要任务。然而，传统的人工巡检方式存在效率低、安全隐患大、难以及时发现并处理问题等不足，已难以满足现代水电站对闸门安全管理的需求。

随着科技的进步，智能化、自动化监测技术逐渐成为解决水电站闸门安全管理问题的重要途径。智能预警系统作为一种集成了现代传感技术、通信技术、计算机技术、人工智能技术等手段的综合监测系统，能够对水电站闸门的运行状态进行实时监测、分析、预警和诊断，为水电站闸门的安全管理提供了有力支持。本文将深入探讨智能预警系统在水电站闸门安全管理中的应用，分析其关键技术、具体应用等。

1 智能预警系统概述

智能预警系统是指利用现代传感技术、通信技术、计算机技术、人工智能技术等手段，对水电站闸门的运行状态进行实时监测、分析、预警和诊断的系统。该系统通过安装在闸门及其相关设备上的各种传感器，实时采集闸门的应力、振动、运行姿态等状态信息，并将这些信息传输至数据处理中心进行分析和处理。根据分析结果，系统可以及时发现并预警闸门运行中的潜在问题，为管理人员提供决策支持，确保闸门的安全、稳定运行。

智能预警系统主要由传感器层、数据处理层和电站层三部分构成。传感器层负责实时采集闸门的各种状态信息，并将其转换为电信号传输至数据处理层。数据处理层对接收到的信号进行滤波、放大、模数转换等预处理操作，并提取特征参数进行故障预警与诊断。电站层

则负责接收数据处理层发送的预警信息和诊断结果，并将其展示给管理人员，以便其及时采取措施进行处理。

2 智能预警系统在水电站闸门安全管理中的应用现状

近年来，国内外在水电站闸门安全管理中应用智能预警系统的案例逐渐增多，取得了显著成效。例如，成都威尔森科技发展有限公司在水电站闸门智能预警系统方面取得了重要突破，其研发的VRS8000-HMT闸门安全监测智能预警系统已经在多个水电站得到成功应用。

该系统通过安装在闸门上的各种传感器，实时监测闸门的应力、振动、运行姿态等状态信息，并利用先进的数据处理与分析技术对这些信息进行深入分析。一旦发现闸门运行中的潜在问题，系统可以立即发出预警信号，并提供详细的诊断报告，帮助管理人员及时采取措施进行处理。实践证明，该系统在提高闸门运行的安全性、可靠性和效率方面发挥了重要作用。

除了成都威尔森公司外，国内外还有许多其他企业在水电站闸门智能预警系统方面进行了积极探索和实践。这些企业通过不断优化传感器技术、数据处理与分析算法以及人工智能技术等方面的创新，推动了智能预警系统在水电站闸门安全管理中的广泛应用和发展。

3 智能预警系统关键技术分析

3.1 传感器技术

3.1.1 应变传感器

应变传感器主要用于监测闸门的应力状态。在闸门运行过程中，由于水流冲击、温度变化等因素，闸门结构会产生应力变化。应变传感器通过测量闸门材料的微小形变，将其转换为电信号输出，从而实现了对闸门应力的实时监测。例如，成都威尔森科技发展有限公司研发的VRS-78B型防水型应变计，具有高精度、高灵敏度、高稳定性等特点，能够准确测量闸门主梁、支臂、面板等关键部位的应力变化，为评估闸门结构强度、预

防应力集中和疲劳破坏提供重要依据。

3.1.2 加速度传感器

加速度传感器主要用于监测闸门的振动响应。在闸门启闭过程中,由于水流冲击、机械振动等因素,闸门会产生振动。加速度传感器能够实时测量闸门的振动加速度,并将其转换为电信号输出。通过对振动信号的分析,可以判断闸门是否存在机械故障,如轴承磨损、齿轮啮合不良等。成都威尔森公司的VRSD3002型电容式三轴低频振动加速度传感器,能够同时测量闸门在X、Y、Z三个方向的振动加速度,具有测量范围广、精度高、稳定性好等特点,为闸门振动监测提供了有力支持。

3.2 数据处理与分析技术

3.2.1 数据采集卡的选型与配置

数据采集卡是连接传感器与数据处理中心的桥梁。在闸门监测中,需要根据传感器的类型和数量,选择合适的数据采集卡,并进行合理的配置。例如,对于应变传感器和加速度传感器,需要选择具有高精度、高分辨率、多通道等特点的数据采集卡;对于倾角传感器和声发射传感器,则需要选择具有高速、高灵敏度、抗干扰能力强等特点的数据采集卡。威尔森公司的VRS8000-HMT智能数据采集系统,采用模块化、分布式结构设计,可根据实际需求灵活配置不同类型的采集板卡,满足闸门监测的多样化需求。

3.2.2 数据传输协议的选择

数据传输协议是确保数据采集与传输效率和可靠性的关键。在闸门监测中,需要选择稳定、可靠、高效的数据传输协议,以确保数据能够实时、准确地传输到数据处理中心。例如,以太网和TCP/IP协议是目前应用最广泛的数据传输协议之一,它们具有传输速度快、稳定性好、可扩展性强等特点,能够满足闸门监测对数据传输的要求。

3.3 人工智能技术

3.3.1 机器学习算法

机器学习算法是人工智能技术的重要组成部分。在闸门故障预警与诊断中,可以利用机器学习算法对采集到的数据进行学习和分析,建立故障预警与诊断模型。例如,采用支持向量机(SVM)、神经网络(NN)等算法对振动信号和声发射信号进行分类和识别,可以实现对闸门故障的准确预警与诊断。此外,还可以利用机器学习算法对闸门的历史运行数据进行学习和分析,挖掘出故障发生的规律和趋势,为故障预测和预防性维护提供依据。

3.3.2 深度学习模型

深度学习模型是人工智能技术的又一重要分支。与传统的机器学习算法相比,深度学习模型具有更强的学习能力和泛化能力。在闸门故障预警与诊断中,可以利用深度学习模型对采集到的图像、声音等多模态数据进行学习和分析,建立更加准确和可靠的故障预警与诊断模型。例如,采用卷积神经网络(CNN)对闸门图像进行特征提取和分类识别,可以实现对闸门表面缺陷和损伤的准确检测;采用循环神经网络(RNN)对闸门振动信号进行时间序列分析和预测建模,可以实现对闸门故障的早期预警和趋势预测。

4 智能预警系统在水电站闸门安全管理中的具体应用

4.1 应力监测

闸门在长时间运行及频繁启闭过程中,受到水流冲击、温度变化等多种因素的作用,易产生应力集中和疲劳破坏,严重威胁其结构安全和稳定运行。因此,通过实时、准确的应力监测,可以有效评估闸门的结构强度,及时发现并处理潜在的应力问题,从而预防事故的发生^[1]。

在智能预警系统中,应变传感器是实现应力监测的关键组件。这些传感器能够高精度地测量闸门结构在受力状态下的微小形变,将机械应变转换为电信号输出。以成都威尔森科技发展有限责任公司的VRS-78B型防水型应变计为例,其具备高灵敏度(500 $\mu\epsilon$ /mV/V)、大量程($\pm 3000\mu\epsilon$)以及优异的稳定性和耐环境性能,能够在复杂多变的水下环境中长期稳定工作。通过将这些应变传感器合理布置在闸门的关键受力部位,如主梁、支臂、面板等,可以实现对闸门应力的全方位、实时监测。

应力监测数据的应用价值不言而喻。一方面,通过对监测数据的定期分析,可以评估闸门的整体结构强度,为闸门的定期检修和维护提供科学依据。当监测到应力异常增大或分布不均时,可以及时发现并处理潜在的应力集中问题,避免闸门因长期过载或疲劳破坏而引发事故。另一方面,应力监测数据还可以为闸门的优化设计和改造提供重要参考。通过对不同工况下应力数据的对比分析,可以识别出闸门结构中的薄弱环节,为后续的加固设计或结构改进提供数据支持。

4.2 振动监测

振动监测是评估闸门运行状态、诊断机械故障的重要手段。闸门在启闭过程中,由于水流冲击、机械摩擦等因素的影响,会产生不同程度的振动。这些振动信号中蕴含着丰富的设备运行信息,通过对振动信号的分析处理,可以及时发现闸门运行中的异常现象,为故障预警和诊断提供有力支持^[2]。

加速度传感器是振动监测的核心设备。以成都威尔森公司的VRSD3002型电容式三轴低频振动加速度传感器为例,其具备宽测量范围($\pm 5g$)、高灵敏度($174mV/g$)以及优异的稳定性和抗干扰性能,能够准确捕捉闸门振动信号的细微变化。通过将这些传感器合理布置在闸门的支臂、面板等关键部位,可以实现对闸门振动响应的实时监测。

振动监测数据在闸门安全管理中的应用广泛而深入。首先,通过对振动信号的频谱分析,可以识别出闸门运行中的共振频率和异常振动成分,为故障预警和诊断提供重要依据。例如,当监测到闸门在某一特定频率下振动幅值异常增大时,可能预示着闸门结构中存在松动、磨损或裂纹等缺陷,需要及时进行处理。其次,振动监测数据还可以用于评估闸门的运行状态和性能。通过对不同工况下振动数据的对比分析,可以判断闸门的运行是否平稳、是否存在异常振动等现象,为闸门的优化运行和调度提供数据支持^[3]。

4.3 运行姿态监测

闸门在启闭过程中,需要保持正确的运行姿态,以确保其能够准确到位、稳定可靠地工作。然而,由于水流冲击、机械摩擦等因素的影响,闸门在运行过程中可能会出现卡阻、偏移和失稳等现象,严重影响其正常运行和安全性。

倾角传感器是实现运行姿态监测的重要设备。以成都威尔森公司的VRS126T-90-485-MB型防水型双轴倾角传感器为例,其具备高精度(0.06°)、大量程($\pm 90^\circ$)以及优异的抗干扰性能和稳定性,能够准确测量闸门的倾斜角度和运行姿态。通过将这些传感器合理布置在闸门的面板或支臂等关键部位,可以实现对闸门运行姿态的实时监测。

运行姿态监测数据在闸门安全管理中的作用不可忽视。一方面,通过对监测数据的实时分析,可以及时发现闸门运行中的卡阻、偏移和失稳等现象,为故障预警和处理提供重要依据。例如,当监测到闸门在启闭过程中出现异常倾斜或偏移时,可能预示着闸门存在机械故障或操作不当等问题,需要及时进行调整或维修。另一方面,运行姿态监测数据还可以用于评估闸门的启闭效率和稳定性。通过对不同工况下运行姿态数据的对比分析,可以判断闸门的启闭过程是否平稳顺畅、是否存在异常波动等现象,为闸门的优化调度和运行提供数据支持。

5 启闭机监测

在启闭机监测中,各种传感器发挥着至关重要的作用。例如,通过转速传感器可以实时监测启闭机的转速和运行状态;通过位移传感器可以测量启闭机的行程和位置信息;通过振动传感器可以捕捉启闭机在运行过程中的振动信号等。这些传感器将采集到的数据传输至数据处理中心进行分析处理,实现对启闭机运行状态的实时监测和故障预警。

启闭机的价值体现在监测数据上。一方面,通过对监测数据的实时分析,可以及时发现启闭机运行中的异常现象和故障隐患,为故障预警和处理提供重要依据。例如,当监测到启闭机转速异常波动或振动幅值增大时,可能预示着启闭机存在机械故障或润滑不良等问题,需要及时进行检查和维修。另一方面,启闭机监测数据还可以用于评估启闭机的运行效率和性能。通过对不同工况下监测数据的对比分析,可以判断启闭机的运行状态是否稳定可靠、是否存在能耗过高等问题,为启闭机的优化运行和节能降耗提供数据支持^[4]。

结语

本文通过对智能预警系统在水电站闸门安全管理中的应用进行深入探讨和分析,得出了以下结论:智能预警系统在提高闸门运行的安全性、可靠性和效率方面发挥了重要作用;其关键技术主要包括传感器技术、数据处理与分析技术以及人工智能技术等,其应用面临着诸多挑战但也具有广阔的发展前景。展望未来,随着科技的不断进步和应用场景的不断拓展,智能预警系统将在水电站闸门安全管理中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 安东,李峰,陈炜,等. 智能接地监测预警系统在水电站和风电场的应用[J]. 四川水力发电, 2017, 36 (04): 116-119.
- [2] 方子帆,黄瑞鸿,舒承宇,等. 水电站闸门启闭机吊重入槽干涉算法与控制研究[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22 (06): 816-821.
- [3] 于权伟,王海峰,曹晨星,等. 龙羊峡水电站溢洪道闸门及启闭机改造设计[J]. 水电站机电技术, 2025, 48 (01): 64-67+129.
- [4] 刘宇梁,张志辉,刘文灶. 基于水电站闸门的智能监测与故障诊断系统设计[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10 (05): 88-92.